

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑩ **Offenlegungsschrift**
DE 43 39 497 A 1

⑤ Int. Cl.⁸:
G 01 L 1/24
G 01 P 15/08

②1 Aktenzeichen: P 43 39 497.3
②2 Anmeldetag: 18. 11. 93
②3 Offenlegungstag: 24. 5. 95

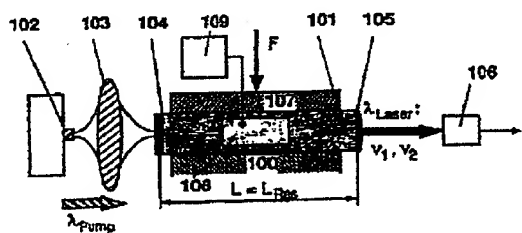
DE 43 39 497 A 1

⑦1 Anmelder:
Holzapfel, Wolfgang, Prof. Dr.-Ing., 34233 Fuldatal, DE

⑦2 Erfinder:
Holzapfel, Wolfgang, Dr.-Ing., 34233 Fuldatal, DE;
Neuschaefer-Rube, Stephan, Dipl.-Ing., 34125 Kassel, DE

⑤4 **Optische Kraftmeßeinrichtung mit Kraftrichtungserkennung**

⑤7 Die optische Kraftmeßeinrichtung mit Kraftrichtungserkennung besteht aus einem photoelastischen Sensorelement (101), welches laserektiv ist und über eine zusätzliche meßkraftunabhängige Modulationseinrichtung (108, 109) verfügt. Das Sensorelement besitzt an seinen Enden Verspiegelungen (104, 105) und bildet so einen monolithischen optischen Sensoroszillator, der mittels einer Strahlungsquelle (102) und einer Einkoppeloptik (103) zu Laseraktivität angeregt wird. Dieser Sensoroszillator strahlt orthogonal polarisiertes Licht mit den Frequenzen ν_1 und ν_2 ab. Die Meßkraft F wirkt orthogonal zur Resonatorachse direkt oder über eine Krafteinleitungseinrichtung (107) auf den photoelastischen Sensoroszillator ein und induziert in diesem eine optische Phasenanisotropie. Durch die Modulationseinrichtung werden zusätzliche Phasenanisotropien im Sensorelement erzeugt. Daher ändern sich die ausgekoppelten Frequenzen ν_1 und ν_2 . Aus der Frequenzdifferenz $f = [\nu_2 - \nu_1]$ bei mehreren unterschiedlichen Phasenanisotropien der Modulationseinrichtung wird der Betrag und die Richtung der Meßkraft rechnerisch bestimmt. Die optische Kraftmeßeinrichtung mit Kraftrichtungserkennung kann zur Messung der Kraft oder einer daraus abgeleiteten Meßgröße wie Beschleunigung oder Masse eingesetzt werden.



DE 43 39 497 A 1

DE 43 39 497 A1

Beschreibung

Gattung des Anmeldungsgegenstandes

Die Erfindung betrifft eine optische Kraftmeßeinrichtung, die zur Messung des Betrages und der Wirkrichtung einer Kraft oder einer daraus abgeleiteten Meßgröße, wie Beschleunigung, Druck, Masse und Drehmoment, eingesetzt werden kann.

Angabe zur Gattung

Die Kraftmeßeinrichtung enthält einen monolithisch oder semimonolithisch realisierten Sensoroszillator aus einem laseraktiven Festkörpermateriale mit photoelastischen und falls erforderlich auch elektrooptischen oder magnetooptischen Eigenschaften und ermöglicht auch ohne aufwendige aktive Stabilisierung des Oszillatorsignals die hochgenaue Sensierung von Kräften und Kraftkomponenten orthogonal zur Resonatorachse nach Betrag und Wirkrichtung. Diese Kraftmeßeinrichtung kann auch in leicht modifizierter Ausführung zur Messung einer von der Kraft abgeleiteten physikalischen Größe (Beschleunigung, Druck, Masse oder Drehmoment) angewandt werden.

Stand der Technik

Aus der wissenschaftlichen Literatur ist bekannt, daß Laseroszillatoren mit resonatorinterner Phasenanisotropie Strahlungsanteile mit orthogonalen Polarisationssebenen emittieren können (M. Doyle, M. B. White, Appl. Phys. Lett. (1964), 10, Seite 193—195). Es ist ferner aus mehreren Patenten (Patent US 3 517 560, US 3 786 681, US 3 800 594, US 4 048 859, US 4 449 825) bekannt, wie die Kraft unter Nutzung des resonatorinternen photoelastischen Effektes optisch gemessen werden kann. Die Messung der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung mit laseroptischen Systemen, ist für die meßtechnische Industrie von Bedeutung und somit Gegenstand neuerer Patente und Offenlegungsschriften (US 4 233 847, EP 0 229 448, DE 36 19 498 A1, US 4 841 774).

Ein weiterer Lösungsvorschlag zur Messung der Kraft oder der Beschleunigung ist in der deutschen Patentschrift DE 26 33 178 angegeben. Hier wird zusätzlich eine aktive Stabilisierung einer der beiden orthogonal polarisierten optischen Moden im Resonator vorgeschlagen, mit der eine Unterdrückung von Störeinflüssen, wie Temperatur, Vibration usw. erreicht werden soll.

Der experimentelle Nachweis, daß auf Grundlage des resonatorinternen photoelastischen Effektes in Verbindung mit einer aktiven Signalstabilisierung des Meßoszillators tatsächlich genaue Kraftmessungen möglich sind, wird erstmals in den Zeitschriftenveröffentlichungen Holzappel, W.; Settgast, W.: 1) Applied Physics B 49, 169—172 (1989), 2) Applied Optics 28 4585—4594 (1989), 3) Techn. Messen im 57, 323—334 (1990) beschrieben.

Diesen Patenten und Veröffentlichungen ist gemeinsam, daß sie von einem modularen Aufbau des Meßoszillators ausgehen, d. h. insbesondere die Nutzung eines laseraktiven Materials und eines davon getrennten photoelastischen Aufnehmers in einem Lasersonator beschreiben. Als geeignetes laseraktives Material wird immer ein Gas angegeben bzw. genutzt, das sich in einem durch transparente Fenster abgeschlossenen Volumen (Gasentladungsstrecke) befindet. Als kraftsensierendes Element ist zusätzlich ein separates photoelastisches und transparentes Material, z. B. ein Glasaufnehmer, im Resonator erforderlich.

Orthogonal polarisierte optische Strahlungsanteile treten auch in optisch anisotropen Festkörperlaseren z. B. in Nd:YAG-Lasern auf (H. G. Danielmeyer, Journal of Quantum Electronics, QE 6, No. 2, Februar 1970, S. 101—104). Als Energiequelle ist dort eine Wolfram-Jod-Lampe angegeben. Laserbetrieb mit orthogonalen Strahlungsanteilen bei Verwendung einer Lasodiode als Energiequelle beschreibt die Zeitschriftenveröffentlichung P. Esharik, A. Owyong, Journal of the Optical Society of America, Vol. 4, No. 1, Januar 1987, S. 41—47. Nach unseren Beobachtungen erfolgt die Grundaufspaltung in zwei zueinander und zur Strahlrichtung orthogonale Strahlungsanteile durch Offset-Phasenanisotropien (Restanisotropien) im Lasermaterial, verursacht etwa durch interne mechanische Materialspannungen oder durch Kristalleigenschaften. Eine eventuell gleichzeitig vorhandene Verlustanisotropie, die einen der Strahlungsanteile unterdrückt, kann durch Erhöhung der Pumpleistung überwunden werden.

Bei den angegebenen Fundstellen ist die Meßaufgabe immer auf die Ermittlung unbekannter Kräfte beschränkt, die in einer vorgegebenen Richtung auf das kraftsensierende Element einwirken. Dies ist auch bei der Patentanmeldung P 43 22 291.9 der Fall, in der erstmalig die Nutzung eines monolithischen kristallinen Sensoroszillators beschrieben wird.

Kritik des Standes der Technik

Von Nachteil bei photoelastischen Kraftmessern auf der Grundlage von Gasen als laseraktives Material ist, daß dort im allgemeinen orthogonal polarisierte Strahlungsanteile nur auftreten, wenn mindestens zwei benachbarte Longitudinalmoden gleichzeitig angeregt werden. Jede der angeregten Longitudinalmoden tritt jeweils mit nur einer Polarisationsrichtung auf. Daher ergibt sich als Ausgangssignal des photoelastischen Kraftsensors in modularer HeNe-Technologie mit einem photoelastischen Sensorelement aus Glas die hochfrequente Mischfrequenz

$$f \approx M \cdot F + FSR + 8F \quad (1)$$

mit

$$M = \frac{2FSR}{\lambda_{Las}} \frac{C_0}{D} G : \text{Meßempfindlichkeit,}$$

FSR = $c/2L'_{res}$: Free Spectral Range des Laseroszillators,

c: Lichtgeschwindigkeit,

$L'_{res} = n \cdot L_{res}$: optische Resonatorlänge,

n: optische Brechzahl des Festkörpermateri- als.

λ_{Las} : Laserwellenlänge,

C_0 : Photoelastischer Koeffizient des Sensorelementmaterials,

G: Geometriefaktor, abhängig von Querschnitt und Lagerung des Sensorelementes

D: Durchmesser des Sensorelementes (nur bei rundem Querschnitt, sonst: Breite des Sensorelementes),

δf : Fehleranteil.

Gemäß Gl(1) überlagert sich dem Nutzsignalanteil $\Delta f = M \cdot F$, der der Meßkraft F proportional ist, neben einem Fehlerterm δf auch hochfrequenter Offset-Anteil ($= FSR$), der dem Abstand benachbarter Longitudinalwellenformen des Meßoszillators entspricht. Jede störungsbedingte Änderung der optischen Resonatorlänge n L_{res} moduliert daher nicht nur die Meßempfindlichkeit, sondern verfälscht auch den kraftproportionalen Signalanteil $M \cdot F$ als zusätzlicher superponierender Fehler.

Da der Offset-Anteil $FSR \approx 10^8 - 10^9$ Hz groß gegenüber dem eigentlichen Meßeffect $\Delta f = M \cdot F$ (Größenordnung 1 MHz) ist, müssen nachteilig aufwendige Frequenzmesser eingesetzt werden, die in der Lage sind, vergleichsweise kleine Frequenzänderungen bei Hochfrequenzsignalen von etwa 1 GHz genau zu messen.

Diese Zusammenhänge sind in den vorstehend genannten Veröffentlichungen und Patentanmeldungen zu Kraftmeßsystemen auf der Basis von Gaslasern nicht berücksichtigt worden, was wiederum erklärt, daß die Laserverfahren in der praktischen Meßtechnik bisher keine Anwendung gefunden haben. Die Anwendung von neuartigen Festkörperlaser-technologien, wie sie in der Patentanmeldung P 43 22 291.9 beschrieben sind, ermöglicht es, Sensoroszillatoren mit niederfrequentem Ausgangssignal zu realisieren. Hier treten auch dann orthogonal polarisierte Strahlungsanteile auf, wenn nur eine einzige longitudinale Modenordnung im transversalen Grundmodus TEM₀₀ angeregt ist. In diesem Fall vereinfacht sich Gl(1) zu

$$f \approx M \cdot F + \delta F \quad (2)$$

d. h. der Offset-Anteil FSR kommt nicht vor. Neuartige Laserdioden ermöglichen das effiziente Pumpen von Festkörperlaser- n durch Einstrahlung monochromatischer Strahlung der Wellenlänge λ_{Pump} . Die Patentanmeldung beschränkt sich auf kristalline laserfähige und photoelastische Materialien. Die Nutzung nichtkristalliner Materialien wird nicht beansprucht.

Alle bekannten Lösungen photoelastischer Meßverfahren sind immer auf die Ermittlung der Kraft in einer vorgegebenen Einwirkrichtung beschränkt. Meßeinrichtungen zur kombinierten Ermittlung des Betrages und der Richtung eines unbekannten Kraftvektors mit ein und derselben Meßeinrichtung werden nicht beschrieben.

Aufgabe

Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, photoelastische Kraftmessungen nach Betrag und nach Richtung mit hoher Genauigkeit und Auflösung zu ermöglichen und gegenüber dem aufgezeigten Stand der Technik eine Miniaturisierung der Meßeinrichtung bei gleichzeitiger Steigerung ihrer Genauigkeit und Funktionsfähigkeit zu ermöglichen. Außerdem muß die Möglichkeit jeder Verlagerung zwischen Aufnahmerelement und Resonatorachse eliminiert bzw. minimiert werden. Die kleinstmögliche Baugröße des Meßoszillators muß angestrebt werden, um die Meßempfindlichkeit durch Vergrößerung des Free Spectral Range FSR zu steigern und den Einfluß der polarisationsabhängigen Störungen durch Verkleinerung des Modenvolumens zu vermindern. Thermische Störeffekte, die durch eine nicht monochromatische (breitbandige) Energieversorgung des Meßoszillators bedingt sind, müssen verhindert werden und alle mechanisch-elektrischen Kontakte zum Meßoszillator zu eliminieren. Desweiteren sollen definiert zusätzliche kraftunabhängige Phasenanisotropien in den Resonator eingebracht werden können, um auch die Bestimmung der Kraft- richtung zu ermöglichen.

Lösung

Diese Aufgabe wird durch die Meßeinrichtung, die durch die Merkmale des Anspruchs 1 sowie die Unteransprüche 1 bis 8 gekennzeichnet wird, gelöst.

Beschreibung von Ausführungsbeispielen

Die Erfindung wird anhand der Zeichnungen beispielhaft näher erläutert. Die Fig. 1 zeigt das Grundprinzip der Erfindung eines monolithischen optischen Sensoroszillators mit Kraft- richtungserkennung, in Fig. 2 ist eine Modifikation des monolithischen Oszillators dargestellt, Fig. 3 beschreibt eine teilmonolithische Ausführung zur Messung von Meßkraftbetrag und -richtung, Fig. 4 eine vereinfachte Ausführung zur Bestimmung des Kraft- betrages bei bekannter Kraft- richtung, Fig. 5 erläutert die Anwendung eines aktiven Stabilisierungsverfahrens,

welches erforderlichenfalls eingesetzt werden kann.

Anhand von Fig. 1 wird der Erfindungsgedanke verdeutlicht. In dieser Meßeinrichtung bilden die Spiegel 104 und 105 zusammen mit dem optisch transparenten Sensormaterial 101 einen phasensteuerbaren Resonator. Der Spiegel 104 ist hochgradig transparent für die zur Anregung des Lasers notwendige Pumpstrahlung der Wellenlänge λ_{Pump} , die z. B. von einer Laserdiode 102 erzeugt wird, und gleichzeitig hochgradig reflektierend für die Laserwellenlänge λ_{Las} . Anstelle dieser longitudinal eingestrahnten Pumpstrahlung ist auch transversales Pumpen, d. h. seitliche Einstrahlung in das Sensormaterial, möglich. Die Eingangsgröße Meßkraft F wirkt orthogonal zur Resonatorachse auf das in einem Halter 100 gelagerte optisch transparente Sensorelement 101 z. B. des Durchmessers D und der Dicke L ein. Kraftkomponenten in Resonatorachsenrichtung werden nicht erfaßt, weil diese in Ausbreitungsrichtung der Laserstrahlung liegen. Im Sensorelement 101 wird durch die Meßkraft F infolge des photoelastischen Effektes eine optische Phasenanisotropie induziert, die sich in Form einer Phasendifferenz Δ_F äußert. Der Betrag der Phasendifferenz Δ_F und deren Ausrichtung α_F zu einer Referenzachse wird durch die Differenz der sekundären d. h. in der Ebene orthogonal zur Resonatorachse vorhandenen mechanischen Hauptspannungen σ_1 und σ_2 bestimmt, die durch die Meßkraft F hervorgerufen werden (H. Wolf, Spannungsoptik, Band 1 Grundlagen, Springer Verlag, Berlin, 1976). Die sekundäre mechanische Hauptspannung σ_1 ist im Winkel α_F ausgerichtet. Durch Kenntnis der Differenz $\sigma_1 - \sigma_2$ der sekundären mechanischen Hauptspannungen und des Winkels α_F ist der Betrag und die Richtung der Meßkraft F orthogonal zur Resonatorachse eindeutig bestimmbar. Dabei ist die Geometrie des Sensorelementes und der Kraftein- und -ausleitung zu berücksichtigen. Zusätzlich wird in dem Material mit den als Elektroden ausgeführten Stellgliedern 108 und dem Generator 109 ein elektrisches Feld der Feldstärke E im Winkel α_M zur Referenzachse erzeugt. Hierdurch entsteht infolge des elektrooptischen Effektes in dem Material 101 eine zusätzliche Phasendifferenz Δ_M mit der Ausrichtung α_M . Die Phasendifferenzen Δ_F und Δ_M führen zu einer resultierenden Phasendifferenz Δ deren Betrag die Frequenzdifferenz $f = |\nu_2 - \nu_1|$ zwischen den Teilresonanzstellen der gleichen longitudinalen Modenordnung des phasenanisotropen Resonators bestimmt. Es gilt:

$$f = \frac{\text{FSR}}{\pi} \cdot \Delta \quad (3)$$

Handelt es sich bei dem optisch transparenten Sensormaterial um einen kubischen Kristall der Kristallklasse $m\bar{3}m$, z. B. Yttrium-Aluminium-Granat (YAG), der in $[111]$ -Richtung (Raumdiagonale des Kristallgitters) durchstrahlt wird, dann ergibt sich die Frequenzdifferenz f zu

$$f = \frac{n^3 \text{FSR}}{3\lambda_{\text{Las}}} \left[\left(E^2 s_L \cos 2\alpha_M + \frac{Gp|F|}{D} \cos 2\alpha_F \right)^2 + \left(E^2 s_L \sin 2\alpha_M - \frac{Gp|F|}{D} \sin 2\alpha_F \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

mit $p = p_{11} - p_{12} + 2 p_{44}$: resultierender spannungsoptischer Koeffizient des Materials aus den Einzelkoeffizienten p_{11} , p_{12} und p_{44} .

$s = s_{11} - s_{12} + 2 s_{44}$: resultierender Koeffizient des quadratischen elektrooptischen Effektes des Materials aus den Einzelkoeffizienten s_{11} , s_{12} und s_{44} .

Hierbei ist vorausgesetzt, daß im Laserkristall keine natürliche Offset-Phasenanisotropie vorhanden ist und das elektrische Feld E innerhalb der gesamten Resonatorlänge L konstant ist. Die spannungsoptischen Koeffizienten p_{11} , p_{12} , p_{44} sind beschrieben in: J. F. Nye, Physical Properties of Crystals, Clarendon Press, Oxford, 1987, die Koeffizienten s_{11} , s_{12} , s_{44} des quadratischen elektrooptischen Effektes erläutert: A. Yariv, P. Yeh, Optical Waves in Crystals, John Wiley & Sons, New York, 1984.

Wird das laseraktive Sensorelement durch eine geeignete Strahlungsquelle 102 und Einkoppeloptik 103 optisch gepumpt, so wird aus dem passiven phasenanisotropen Resonator ein aktiver Laser. Um laseraktiv zu sein, ist eine Dotierung des YAG-Kristalls z. B. mit Neodym (Nd) notwendig. Dieser Laser enthält somit nur ein Bauteil, welches die Funktion des verstärkenden Mediums für den Laser und die des Sensormaterials erfüllt und welches zusätzlich kraftunabhängig (aber polarisationsabhängig) phasenmodulierbar ist.

Die Differenzfrequenz f zwischen den beiden orthogonal polarisierten optischen Frequenzen der gleichen longitudinalen Modenordnung muß elektronisch gemessen werden. Die Messung kann in einer Auswertungseinrichtung mit den üblichen Auswerteverfahren erfolgen, d. h. Abbildung der Strahlung auf eine gemeinsame Schwingungsebene mit einem Polarisator und anschließende Überlagerung der Strahlungsanteile auf einer Photodiode zur Bildung der Differenzfrequenz f , die mit einem elektronischen Zähler oder einem elektronischen Spektralanalysator gemessen wird. Longitudinaler Monomodebetrieb wird erreicht, indem der Resonator bei vorgegebener Pumpleistung hinreichend kurz ausgeführt wird. Sind im Sensoroszillator mehrere longitudinalen Modenordnungen angeregt, so ist in der Auswertungseinrichtung ein optischer oder elektronischer Filter notwendig, der für ein eindeutiges Differenzfrequenzsignal f sorgt, z. B. ein Etalon oder ein elektronischer Tiefpaßfilter.

Die Ermittlung von Betrag $|F|$ und Richtung α_F der Meßkraft F kann in drei Schritten erfolgen:

1. ist kein elektrisches Feld vorhanden ($E_1 = 0$), so ergibt sich mit Hilfe der dann gemessenen Differenzfrequenz f_1 aus Gl(4):

$$|F| = \frac{3\lambda_{\text{Las}} D}{n^3 \text{FSR} Gp} f_1 \quad (5)$$

d. h. der Betrag der Meßkraft F ist eindeutig aus der Differenzfrequenz f_1 ermittelbar.

2. Zur Ermittlung des Winkels α_F wird zunächst z. B. ein Feld E_2 in der Richtung $\alpha_{M2} = 0^\circ$ angelegt und die jetzt vorhandene Frequenz f_2 ermittelt. Der Winkel α_F berechnet sich nun zu

$$\cos 2\alpha_F = \frac{\left(\frac{3\lambda_{\text{Las}} f_2}{n^3 \text{FSR}}\right)^2 - (E^2 sL)^2 - \left(\frac{Gp|F|}{D}\right)^2}{2E^2 sL Gp|F|} \quad (6)$$

3. Das Vorzeichen von α_F ist z. B. durch Anlegen eines Feldes E_3 in Richtung $\alpha_{M3} = 45^\circ$ aus der dann vorhandenen Differenzfrequenz f_3 aus der Gleichung

$$\sin 2\alpha_F = -\frac{\left(\frac{3\lambda_{\text{Las}} f_3}{n^3 \text{FSR}}\right)^2 - (E^2 sL)^2 - \left(\frac{Gp|F|}{D}\right)^2}{2E^2 sL Gp|F|} \quad (7)$$

ermittelbar.

Ist im Sensorelement eine natürliche Offset-Phasenanisotropie vorhanden, ist eine leichte Modifikation des Verfahrens erforderlich. Mit Hilfe der Ergebnisse einer Nullmessung, die bei verschwindender Meßkraft F und nicht vorhandenem elektrischen Feld E durchgeführt wird, kann der Einfluß der Offset-Phasenanisotropie kompensiert werden.

Für die optische Kraftmeßeinrichtung ist ein Sensorelement erforderlich, welches gleichzeitig laseraktive, photoelastische und gegebenenfalls auch elektrooptische Eigenschaften hat. Als Sensormaterialien kommt eine Vielzahl von Kristallen und nichtkristallinen Werkstoffen (z. B. neodym-dotiertes Glas) in Frage. Durch die Verwendung eines Materials kristalliner Struktur mit photoelastischen und elektrooptischen Eigenschaften (z. B. Nd:YAG) werden in geschickter Weise folgende Vorteile kombiniert:

1. Bei der photoelastischen Wandlung der Meßkraft F in die Frequenz treten keine störenden Kriech- und Hystereseeffekte auf, weil durch die Gitterstruktur des kristallinen Sensormaterials im Gegensatz zu Gläsern keine Beweglichkeit der Atome unter Krafteinfluß möglich ist.
2. Die optische Linienbreite des Laserlichtes ist bei gleicher Dotierung für kristallines Wirtsmaterial (z. B. Nd:YAG) wesentlich schmäler als für isotropes Wirtsmaterial (z. B. neodym-dotiertes Glas). Bei hinreichend hoher Stabilität der Laserwellen-Mittenfrequenz und hoher Meßempfindlichkeit (d. h. kurze Resonatorlänge) kann daher mit dem kristallinen Lasermaterial die untere Meßgrenze (Auflösung) deutlich verbessert werden.
3. Durch die Nutzung des elektrooptischen Effektes können zusätzliche kraftunabhängige Phasenanisotropien erzeugt werden, die eine Krafrichtungserkennung ermöglichen.

Eine weitere Möglichkeit, eine zusätzliche kraftunabhängige Phasenanisotropie zu erzeugen, besteht darin, mit Hilfe von Piezostellgliedern zusätzliche mechanische Spannungen im Sensorelement zu erzeugen.

Bei der Ausführung nach Fig. 1 bilden die Spiegel 104 und 105 und das photoelastische, laseraktive Material 101 einen monolithischen Sensoroszillator. Diese Ausführungsform bietet die Möglichkeit, sehr kompakte, störungsempfindliche kraftmessende optische Sensoroszillatoren herzustellen, da alle Grenzflächen im Resonator, die störende Auswirkungen erzeugen können, eliminiert sind. Parasitäre Resonatoren (Subresonatoren) können nicht entstehen. Eine hohe Meßempfindlichkeit wird erzielt, wenn bei der Dimensionierung des Sensoroszillators ein möglichst kurzer Resonator verwendet wird.

Fig. 2 erläutert ein modifiziertes Auswerteverfahren zur Bestimmung von Kraftbetrag und Krafrichtung.

Wird mit Hilfe des elektrischen Feldes E nur die natürliche Offset-Phasenanisotropie kompensiert, stimmt die Polarisationslage der Laserausgangsstrahlung mit der Lage α_F einer der mechanischen Hauptspannungen überein. Um ein eindeutiges Ergebnis zu erhalten, ist das Messen einer Frequenzdifferenz f bei Anlegen eines zusätzlichen elektrischen Feldes erforderlich.

In Fig. 3 ist eine Variante zur Kraftmessung mit Richtungserkennung dargestellt, bei der ein separates modulierendes Element 307 mit Stellgliedern 308 vorhanden ist. Mit Hilfe eines Generators 309 werden in diesem Element definierte Phasendifferenzen Δ_M mit der Hauptachsenrichtung α_M zu der Referenzachse erzeugt. Hierzu kann der z. B. der photoelastische oder der elektrooptische Effekt genutzt werden. Zusammen mit der im Sensorelement 304 durch die Meßkraft F erzeugten Phasendifferenzen Δ_F in der Richtung α_F zur Referenzachse ergibt sich nach dem Äquivalenztheorem von Hurwitz und Jones (Hurwitz, H.; Jones, R.G.: Journal of the Optical Society of America 31 (1941), S. 493—499) eine resultierende Phasendifferenz Δ_{res} , die die meßbare Frequenzdifferenz f bestimmt:

$$\Delta_{res} = \arccos(\cos(\Delta_F - \Delta_M) \sin^2(\alpha_F - \alpha_M) + \cos(\Delta_F + \Delta_M) \cos^2(\alpha_F - \alpha_M)) \quad (8)$$

Durch Erzeugen von mehreren Phasendifferenzen mit unterschiedlichen Hauptachsenrichtungen im modulierenden Element 307 und Messung der durch die resultierende Phasenanisotropie erzeugten Frequenzdifferenz f ist die Bestimmung von Kraftbetrag und -richtung möglich. Werden z. B. zunächst nacheinander im Element 307 zwei unterschiedliche Phasendifferenzen Δ_{M1} , Δ_{M2} erzeugt, deren Hauptachsen parallel zur Referenzachse ausgerichtet sind ($\alpha_{M1} = \alpha_{M2} = 0^\circ$), so ergeben sich dabei zwei unterschiedliche Frequenzdifferenzen f_1 und f_2 . In diesem Fall gilt für Meßkraftbetrag und -richtung:

$$|F| = \frac{3\lambda_{Las} D}{\pi n^3 G_p} \arccos \left(\frac{\cos\left(\frac{f_2 \pi}{FSR}\right) \sin \Delta_{M1} - \cos\left(\frac{f_1 \pi}{FSR}\right) \sin \Delta_{M2}}{\cos \Delta_{M2} \sin \Delta_{M1} - \cos \Delta_{M1} \sin \Delta_{M2}} \right)$$

$$\alpha_F = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{\cos\left(\frac{\pi n^3 G_p}{3\lambda_{Las} D} |F|\right) \cos \Delta_{M2} - \cos\left(\frac{f_2 \pi}{FSR}\right)}{\sin\left(\frac{\pi n^3 G_p}{3\lambda_{Las} D} |F|\right) \sin \Delta_{M2}} \right) \quad (9, 10)$$

Um das Vorzeichen von α_F eindeutig zu bestimmen, ist das Messen einer weiteren Frequenzdifferenz f_3 bei einer Phasendifferenz Δ_{M3} und einer Ausrichtung $\alpha_{M3} \neq 0^\circ$ im modulierenden Element 307 erforderlich. In diesem Fall gilt:

$$\alpha_F - \alpha_{M3} = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{\cos\left(\frac{\pi n^3 G_p}{3\lambda_{Las} D} |F|\right) \cos \Delta_{M3} - \cos\left(\frac{f_3 \pi}{FSR}\right)}{\sin\left(\frac{\pi n^3 G_p}{3\lambda_{Las} D} |F|\right) \sin \Delta_{M3}} \right) \quad (11)$$

Durch Plausibilitätsprüfung mit Hilfe der Gl.(10) und Gl.(11) ist α_F eindeutig festgelegt.

In den Gleichungen (9—11) ist wiederum eine verschwindende Offset-Phasenanisotropie vorausgesetzt. Eine Kompensation der Offset-Anisotropie ist erneut unter Berücksichtigung der Meßwerte einer Nullmessung bei verschwindender Meßkraft F und ohne Modulator-Phasendifferenz möglich.

In Fig. 4 wird eine vereinfachte Meßeinrichtung beschrieben, die die Bestimmung des Betrages der Meßkraft F bei bekannter Richtung α_F ermöglicht. Ist keine natürliche Offset-Phasenanisotropie vorhanden, ist lediglich die Anwendung von Gl.(5) erforderlich, d. h., es muß nur eine einzige Differenzfrequenz f bestimmt werden. Eine Modulationseinrichtung mit Stellgliedern und einem Generator ist nicht erforderlich. Bei nicht verschwindender Offset-Phasenanisotropie bietet sich neben dem bereits beschriebenen Kompensationsverfahren mit Hilfe einer Nullmessung ein vereinfachtes Verfahren an. Bei paralleler bzw. orthogonaler Ausrichtung der Offset-Phasenanisotropie und Meßkraft F kann Gl.(5) weiterverwendet werden, wenn die Differenzfrequenz f vorher korrigiert wird. Je nachdem, ob die Ausrichtung der Offset-Phasenanisotropie parallel oder orthogonal zur Ausrichtung der durch die Meßkraft F hervorgerufenen Phasenanisotropie ist, muß die Differenzfrequenz f_0 , die bei verschwindender Meßkraft F vorliegt, mit negativem oder positivem Vorzeichen berücksichtigt werden:

$$|F| = \frac{3\lambda_{\text{Las}} D}{n^3 \text{FSR} G p} (f \pm f_0) \quad (12)$$

Bei den in den Fig. 1—Fig. 4 dargestellten Varianten der optischen Kraftmeßeinrichtung sind die Resonatorspiegel jeweils in Form von Verspiegelungen des Sensorelementes und gegebenenfalls des Modulatorbauteils realisiert. Es ist ebenso möglich, einen oder beide Resonatorspiegel als separate Spiegel auszuführen.

Die Ausführung nach Fig. 5 erlaubt über die vorgesehene Regeleinrichtung (502 bis 505) die Art der Frequenzverstimmung der beiden optischen Frequenzen ν_1 , ν_2 einer longitudinalen Modenordnung zu verändern. Sind mehrere longitudinale Modenordnungen angeregt, ist ein elektronischer oder optischer Filter erforderlich, so daß nur die Strahlungsanteile einer longitudinalen Modenordnung auf die Photodioden auftreffen. Je nach Einstellung der Regelschaltung erfolgt bei einer Krafteinwirkung die Variation der Frequenz symmetrisch oder asymmetrisch zur Ausgangsabstimmung der Signalanteile. So wird gewährleistet, daß bis zur maximalen Krafteinwirkung die optischen Moden innerhalb der laserfähigen Bandbreite bleiben und so die obere Meßgrenze maximal ausgenutzt wird. Mit einer Regeleinrichtung ist eine aktive Kompensation der polarisationsunabhängigen Störungen möglich, so daß eine Verbesserung der Auflösung durch höhere Laserstabilität gegeben ist.

Patentansprüche

1. Optische Kraftmeßeinrichtung zur gemeinsamen oder getrennten Bestimmung von Kraftbetrag und Kraftrichtung, dadurch gekennzeichnet, daß die Kraftmeßeinrichtung aus einem in den Unteransprüchen 1 bis 7 gekennzeichneten kraftgesteuerten Sensoroszillator in monolithischer bzw. teilmonolithischer Bauweise besteht, der gegebenenfalls zusätzlich polarisationsabhängig modulierbar ist, und gegebenenfalls eine nach dem Unteranspruch 8 gekennzeichnete aktive Stabilisierung für den Sensoroszillator enthält.
2. Kraftgesteuerter und zusätzlich polarisationsabhängig phasenmodulierbarer Sensoroszillator der optischen Kraftmeßeinrichtung gemäß Anspruch 1 in monolithischer Bauweise, dadurch gekennzeichnet, daß das mit einem starren, kräfteausleitenden Gestell (100) verbundene Sensorelement (101) des Oszillators aus einem photoelastischen, laseraktiven und zusätzlich polarisationsabhängig phasenmodulierbaren Festkörpermateriale der geometrischen Länge L und beliebiger Querschnittform besteht und mit geeignet spektral abgestimmten Verspiegelungen (104) und (105) an den sphärisch oder plan geschliffenen Enden versehen ist, so daß ein optischer Resonator gebildet wird und dieser mittels der gestellfesten Strahlungsquelle (102) und der gestellfesten Einkoppeloptik (103) auf der Wellenlänge λ_{pump} die auf die laseraktiven Eigenschaften des photoelastischen Materials abgestimmt ist, optisch gepumpt und zum Oszillatorbetrieb auf der Wellenlänge λ_{Las} angeregt wird, wobei eine Meßkraft F, welche orthogonal zur Resonatorachse direkt oder über die Krafteinleitungseinrichtung (107) auf das Sensorelement (101) einwirkt, dort aufgrund des photoelastischen Effektes eine Phasenanisotropie induziert und im Sensorelement (101) mit Hilfe von elektrisch oder mechanisch betätigten Stellgliedern (108) und eines Generators (109) mindestens drei in Richtung und/oder Betrag unterschiedliche zusätzliche Phasenanisotropien mittels des elektrooptischen, magneto-optischen oder photoelastischen Modulationseffektes zeitlich nacheinander erzeugt werden und die Frequenzen ν_1 und ν_2 der aus einem Spiegel, z. B. (105), ausgekoppelten orthogonal polarisierten Strahlungsanteile des Oszillators infolge der Phasenanisotropien verändert werden, so daß durch die Auswertungseinrichtung (106) zeitlich nacheinander elektrische Signalfrequenzen $f = |\nu_2 - \nu_1|$ entstehen, aus denen der Betrag und die Richtung der Meßkraft F unabhängig von einer Offset-Phasenanisotropie des Sensorelementes rechnerisch ermittelt werden.
3. Kraftgesteuerter und zusätzlich polarisationsabhängig phasenmodulierbarer Sensoroszillator der optischen Kraftmeßeinrichtung gemäß Anspruch 1 in monolithischer Bauweise, dadurch gekennzeichnet, daß ein photoelastisches, laseraktives und zusätzlich polarisationsabhängig phasenmodulierbares Sensorelement (201) wie in Unteranspruch 1 verwendet wird, dessen natürliche Offset-Phasenanisotropie durch die Reglerschaltung (210), den Generator (209) und die elektrisch oder mechanisch betätigten Stellglieder (208) so kompensiert ist, daß der Frequenzmesser (212) bei nicht vorhandener Meßkraft F eine Signalfrequenz $f_0 = 0$ registriert und er bei einer auf das Sensorelement (201) einwirkenden Meßkraft F in der Ebene orthogonal zur Resonatorachse mit unbekanntem Betrag und unbekannter Richtung die Frequenz f_1 anzeigt, die dem Betrag von F direkt proportional ist, und zusätzlich zwecks Kraftrichtungsmessung mit Hilfe des drehbaren Polarisators (206) und des Photodetektors (211) die beiden orthogonalen Polarisationsrichtungen der Strahlungsanteile ermittelt werden, indem mindestens eine Winkelstellung γ_0 des Polarisators (206), bei der die Wechselkomponente mit der Frequenz f_1 im Detektorstrom während der Krafteinwirkung auf das Sensorelement (201) verschwindet bzw. eine um $\pm 45^\circ$ hierzu verschiedene Winkelstellung, bei der das Strommaximum des Photodetektors (211) auftritt, mit dem Winkelmeßgerät (214) gemessen wird und zur eindeutigen Ermittlung der Meßkraftrichtung mit Hilfe der elektrisch oder mechanisch betätigten Stellglieder (208) und des Steuergenerators (209) bei einer bekannten Winkelstellung $\gamma_1 \neq \gamma_0$ der Durchlaßebene des Polarisators (206), die zwischen den Polarisationsrichtungen der Strahlungsanteile liegen muß, eine definierte Phasenanisotropie auf das Sensorelement (201) aufgeschaltet wird, so daß an Hand der dann mit dem Frequenzmesser registrierten elektrischen Signalfrequenz f_2 und des Winkelmeßwertes γ_0 die Wirkrichtung der Meßkraft F mit Hilfe der logischen Schaltung (213) eindeutig ermittelt wird.
4. Kraftgesteuerter und zusätzlich polarisationsabhängig phasenmodulierbarer Sensoroszillator der optischen Kraftmeßeinrichtung gemäß Anspruch 1 in teilmonolithischer Bauweise, dadurch gekennzeichnet, daß das mit dem starren, kräfteausleitenden Gestell (310) verbundene Sensorelement (304) aus einem

photoelastischen und zugleich laseraktiven Festkörpermaterialelement einseitig mit einer geeignet spektral abgestimmten Verspiegelung (305) versehen ist und daß mindestens ein separates, optisch transparentes Modulatorbauteil (307) verwendet wird, welches einseitig mit einer geeignet spektral abgestimmten Verspiegelung (303) versehen ist und so ein optischer Resonator der geometrischen Länge L_{res} gebildet wird, der das Sensorelement (304) und mindestens ein Modulatorbauteil (307) enthält, und daß in dem Modulatorbauteil (307) elektrooptisch, magnetooptisch oder photoelastisch mit Hilfe von elektrisch oder mechanisch betätigten Stellgliedern (308) und des Steuergenerators (309) in Richtung und/oder Betrag unterschiedliche resonatorinterne Phasenanisotropien erzeugt werden und die orthogonal zur Resonatorachse auftretende Meßkraft F nach Betrag und Richtung mit einer Anordnung nach Unteranspruch 1 oder 2 ermittelt wird.

5. Variante der optischen Kraftmeßeinrichtung nach einem der Unteransprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßkraft F orthogonal zur Resonatorachse in einer bekannten Richtung direkt oder über eine Krafteinleitungseinrichtung (107, 207 oder 311) auf das aus einem Festkörpermaterialelement bestehende Sensorelement (101, 201 oder 304) einwirkt und dort eine optische Phasenanisotropie induziert und durch die elektrisch oder mechanisch betätigten Stellglieder (108, 208 oder 308) und den Generator (109, 209 oder 309) eine zusätzliche Phasenanisotropie erzeugt wird und der Betrag der Meßkraft F aus einer einzigen Signalfrequenz f bestimmt wird.

6. Kraftgesteuerter Sensoroszillator der optischen Kraftmeßeinrichtung gemäß Anspruch 1 in monolithischer Bauweise, dadurch gekennzeichnet, daß das mit einem starren, kräfteausleitenden Gestell (400) verbundene Sensorelement (401) aus einem laseraktiven Festkörpermaterialelement kristalliner oder nichtkristalliner Natur (geometrische Länge L , beliebiger Querschnitt) mit photoelastischen Eigenschaften besteht, welches mittels der Strahlungsquelle (402) auf der Wellenlänge λ_{pump} , die auf die laseraktiven Eigenschaften des Materials abgestimmt ist und über die Einkoppeloptik (403) in das Sensorelement (401) eingekoppelt, optisch gepumpt wird, und an seinen Enden beide Resonatorspiegel (404 und 405) trägt und so einen vollmonolithischen optischen Sensoroszillator der geometrischen Länge $L_{res} = L$ bildet, auf den direkt oder über eine Krafteinleitungseinrichtung (407) eine Meßkraft F orthogonal zur Resonatorachse einwirkt und dadurch die ausgekoppelten orthogonal polarisierten Strahlungsanteile der Wellenlänge λ_{laser} hinsichtlich ihrer Frequenzen ν_1 und ν_2 so verändert werden, daß durch die Auswertungseinrichtung (406) ein elektrisches Ausgangssignal mit der Frequenz $f = |\nu_2 - \nu_1|$ entsteht, die vom Betrag der Meßkraft F abhängt und der Betrag der Meßkraft F bei bekannter Wirkrichtung der Meßkraft F durch eine Frequenzmessung bestimmt wird.

7. Variante der optischen Kraftmeßeinrichtung nach dem Unteranspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß ein photoelastisches und laseraktives Sensorelement (401) aus kristallinem oder nichtkristallinem Material mit verspiegelten Endflächen (404) und (405) verwendet wird, welches zusätzlich eine von der Meßkraft F orthogonal zur Resonatorachse unabhängige Offset-Phasenanisotropie — zum Beispiel als Folge von internen mechanischen Materialspannungen oder von Kristalleigenschaften — besitzt, wodurch es zu einer Grundaufspaltung jeder angeregten Wellenform in zwei orthogonal polarisierte, in der Frequenz unterschiedliche Strahlungsanteile kommt, bei der die Polarisationssebene jedes Strahlungsanteiles durch die zugehörige optische Hauptachse des Sensorelementes und durch die Resonatorachse räumlich fixiert ist, und die Offset-Phasenanisotropie durch Drehung des verspiegelten Sensorelementes (401) um die Resonatorachse genau in Richtung der vorgegebenen Eingangsachse der Meßkraft F bzw. senkrecht dazu ausgerichtet wird, so daß eine hochgradige Proportionalität zwischen der mit der Auswertungseinrichtung (406) erfaßten Änderung der elektrischen Signalfrequenz $\Delta f = |f - f_0|$ bzw. $\Delta f = |f + f_0|$ und dem Betrag der Meßkraft F auftritt, wobei f_0 die elektrische Signalfrequenz infolge der Offset-Phasenanisotropie des Sensorelementes (401) ist.

8. Variante der optischen Kraftmeßeinrichtung nach einem der Unteransprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß eine der Verspiegelungen (104, 105, 204, 205, 303, 305, 404 oder 405) des Sensorelementes (101, 201, 304 oder 401) oder gegebenenfalls des Modulatorbauteils (307) durch einen separaten Spiegel gebildet wird oder das beide Verspiegelungen (104 und 105, 204 und 205, 303 und 305, 404 und 405) des Sensorelementes (101, 201, 304 oder 401) und gegebenenfalls des Modulatorbauteils (307) durch separate Spiegel gebildet werden und so ein optischer Resonator entsteht und die Meßkraft F orthogonal zur Resonatorachse nach Betrag und gegebenenfalls auch nach Richtung mit einer Anordnung nach einem der Unteransprüche 1 bis 6 bestimmt wird.

9. Variante der optischen Kraftmeßeinrichtung nach einem der Unteransprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß ein Teil der ausgekoppelten Signalstrahlung des Sensoroszillators (501) mit den Frequenzanteilen ν_1 und ν_2 mittels einer Strahlenteilungseinrichtung (502) in mindestens zwei unterschiedlich polarisierte Strahlungskomponenten aufgeteilt wird und daß diese unterschiedlich polarisierten Strahlungskomponenten über Photodetektoren (503) mit nachfolgender elektronischer Regelschaltung (504) und dem elektromechanischen, elektrooptischen oder elektrothermischen Stellglied (505) dazu verwendet werden, um die optischen Frequenzen ν_1 bzw. ν_2 innerhalb der laseraktiven Bandbreite des Sensoroszillators auf die vorgesehene Referenzfrequenz ν_0 zu stabilisieren und daß ein anderer Teil der optischen Strahlung mit den Frequenzanteilen ν_1 und ν_2 in einer Auswertungseinrichtung (506) als Frequenzsignal $f = |\nu_2 - \nu_1|$ ausgewertet wird.

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

× Fig. 1

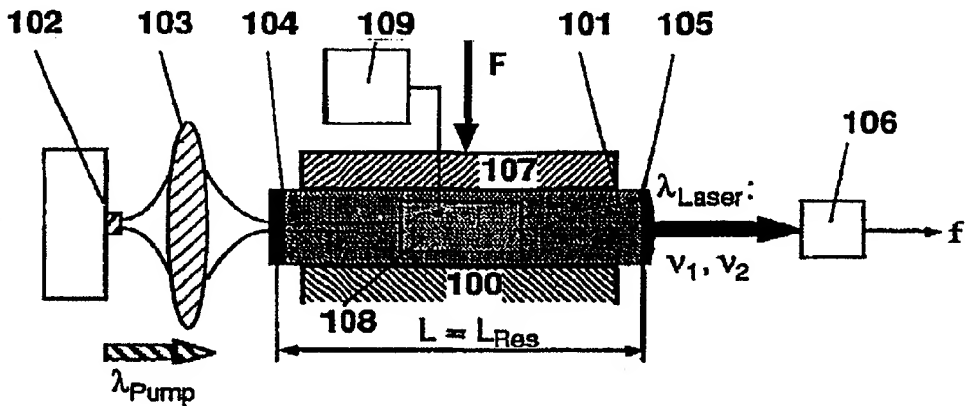


Fig. 2

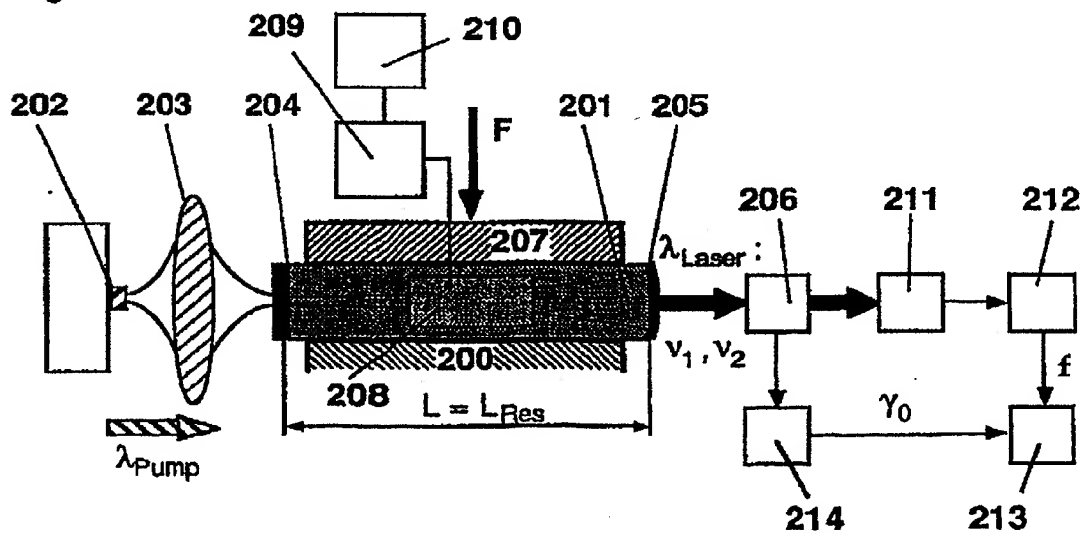


Fig. 3

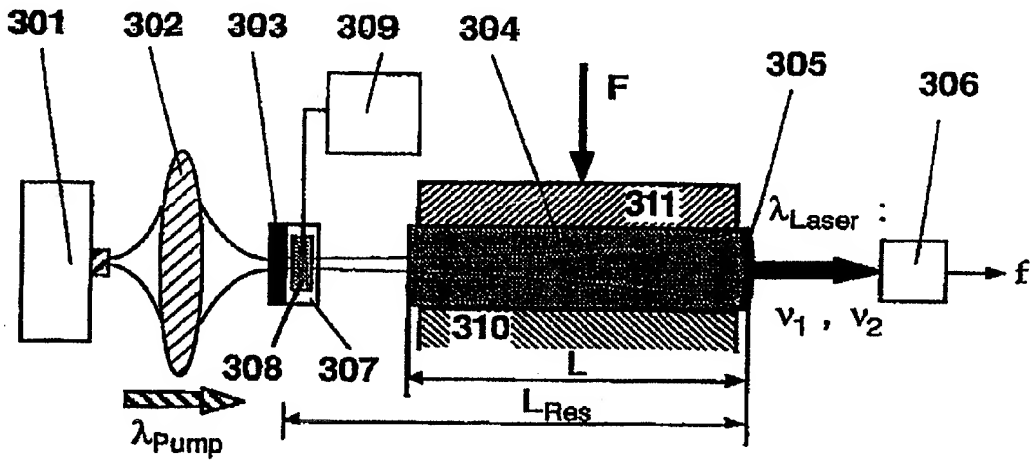
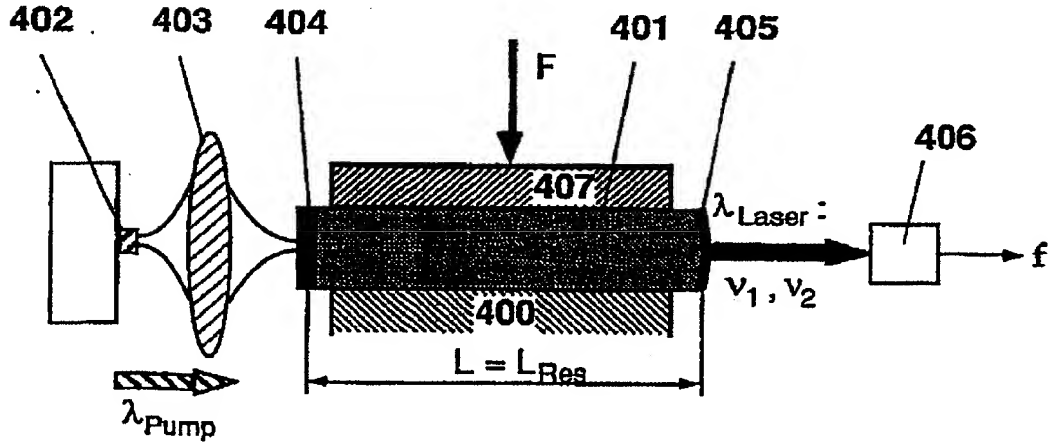


Fig. 4





ZEICHNUNGEN SEITE 3

Nummer:

DE 43 39 487 A1

Int. Cl. 6:

G 01 L 1/24

Offenlegungstag:

24. Mai 1996

Fig. 5

